

(2) 亀裂性岩盤モデルを用いたグラウトの流動特性に関する検討

建設省	土木研究所	正会員	永山 功
建設省	土木研究所	正会員	新高 庸介
建設省	土木研究所	正会員	佐々木 隆
建設省	土木研究所	正会員	○斎藤 正明

A Study on Injection Properties of Grout Using the Joint Net Model

Isao NAGAYAMA, Yosuke NIITAKA, Takashi SASAKI and Masaaki SAITOH
(Public Works Research Institute, Ministry of Construction)

ABSTRACT

Grouting is a principal technique to improve watertightness of dam foundation. Injection properties of grout were studied using a joint net model in a laboratory. Methyl cellulose was used as a substitute of cement grout since a series of tests was conducted using the same model. The following conclusions were obtained from the tests.

- 1) Grout flow is changed from laminar flow to turbulent flow according to its concentration.
- 2) The change of injecting rate of grout by the change of pressure is relatively large under laminar flow, while relatively small under turbulent flow.
- 3) Difference of concentration of grout does not have much effect on injection rate under high pressure.
- 4) Injection pressure is transferred farther under laminar flow than under turbulent flow.
- 5) Grout of high concentration have a tendency to flow more into the joints easy to be injected.
- 6) Under higher pressure, grout of low concentration flows more into the joints difficult to be injected.

1. はじめに

ダムの建設にあたっては、その基礎岩盤の遮水性を改良するために、基礎岩盤に対してグラウチングが実施される。しかし、その仕様はこれまでの施工事例から試行錯誤的に決定されたものであり、対象とする基礎岩盤に適したグラウチング仕様を合理的に決定する手法の確立が強く望まれている。このためには、岩盤の亀裂内を流れるグラウトの流動特性を把握し、それをグラウチング仕様の決定に反映させることが必要である。

本論文は、岩盤内の開口亀裂網をモデル化した模型を用い、グラウト材料として水中コンクリートに用いるメチルセルロース(MC)系増粘剤を代用して、岩盤内の開口亀裂を流れるグラウトの流動特性について検討した結果をとりまとめたものである。

2. 実験の概要

図-1に実験に用いた岩盤内亀裂模型の平面図を示す。この模型は、一辺1003mm、厚さ20mmの2枚のアクリルの間に一辺100mm、厚さ5mmのアクリル板100枚を並べ、幅約0.3mmの亀裂を格子状に配したものである。また、図-2に本実験で用いた実験装置の全体図を示す。本実験装置は、材料タンク内のグラウトを窒素ガスで加圧し、図-1に示した亀裂模型の中央に設けられた注入口から亀裂内にグラウトを注入するものである。なお、実際のダム基礎岩盤のグラウチングでは、グラウトとしてセメントの水溶液を用いるのが一般的であるが、本実験では、同一模型に対してグラウトの粘性や注入圧力を変えて繰り返し実験を行うことから、注入材料として硬化性のないメチルセルロース(MC)系増粘剤の水溶液(以下、高粘性流体という)を使用した。この材

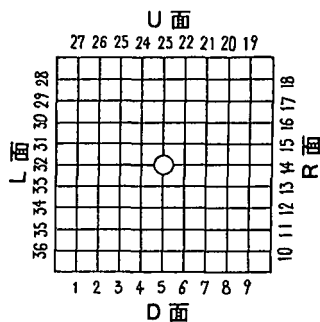


図-1 亀裂模型の平面図

料は、予備的に行った直線流路での注入試験の結果から、濃度の増加によってやや擬塑性流体的な挙動を示す非ニュートン流体であることがわかっている。この高粘性流体の粘度をセメント水溶液の粘度と比較したものが表-1である。表によると、見かけの粘度に限って言えば、重量濃度0.3%の高粘性流体の粘度は水セメント比W/C=4のセメント水溶液の粘度とほぼ等しく、また、重量濃度1%の高粘性流体の粘度はW/C=2のセメント水溶液の粘度とほぼ等しいことがわかる。

次に、実験ケースを表-2に示す。注入材料の濃度は0~2.5%の7濃度とした。また、実験時の注入圧力は0.2~5kgf/cm²とした。これは、亀裂内の平均圧力勾配に換算すると4~100gf/cm²/cm程度となる。なお、実験時の気温、水温の変化はほとんどなかったため、実験時の温度による粘性の補正は特に行わなかった。また、注入材料の流量は亀裂模型の外周で各亀裂から出てくる注入材料の流出量から測定し、亀裂内の圧力分布は格子状の亀裂の交差部に圧力変換器を取り付けて測定した。

3. 実験結果

3.1. 注入圧力と総流量の関係

水および種々の濃度のグラウトについて、注入圧力と総流量の関係を図-3に示す。グラウトの濃度が低いと総流量が大きくなるのは当然の結果であるが、図によれば、グラウトの濃度が低くなると注入圧力と総流量の関係を表すグラフの勾配が緩くなり、逆にグラウトの濃度が高くなるとグラフの勾配が急になることがわかる。そこで、水および種々の濃度のグラウトについて、図-3から求めたグラフの勾配（この勾配は注入圧力対数の増加に対する総流量の対数の増加率を表し、これを流量増加指数と定義する）を整理した結果が図-4である。図によれば、水の流量増加指数は0.5程度であり、グラウトの濃度が0.5%程度になるまではグラウトの濃度の増加とともに流量増加指数は急激に増加するが、それ以降はグラウトの濃度が増加しても流量増加指数は穏やかに変化し、その値は概ね1程度となっている。

いま、ニュートン流体を考えると、圧力勾配*i*と平均流速*v*の関係は層流状態では*v* = *k i*、乱流状態では*v* = *f i*^{0.5}で表される（*k*、*f*は流体および亀裂の状態によって定まる係数）。そこで、図-3、図-4の結果は、水および濃度の低いグラウトではその流れが乱流状態にあること、また濃度の高いグラウトではその流れが層流状態にあることを示している。なお、水の場合に流量増加指数が0.5よりも若干大きくになっているのは、

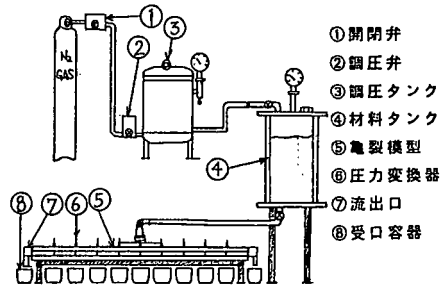


図-2 実験装置

表-1 実験に用いた注入材料とセメント水溶液の粘度

	水	高粘性流体	セメント水溶液
濃度または配合	—	0.3%	1%
粘度(mPa.s)	3	5	14
			W/C=4
			W/C=2
			5
			13

なお、セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。高粘性流体を擬塑性流体として近似した場合、せん断速度 $dv/dz = r^{-1/2}/\mu$ （濃度2%）となる。

表-2 実験ケース

注入材料	水および高粘性流体
濃度	0, 0.3, 0.4, 0.5, 1, 2, 2.5 %
注入圧力	0.2 ~ 5 kgf/cm ²

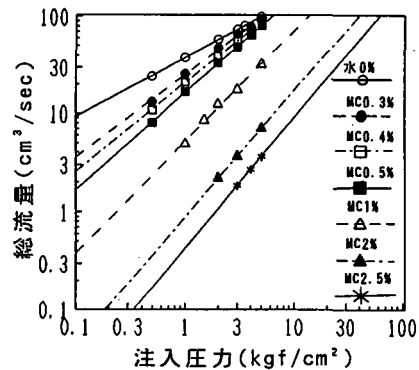


図-3 注入圧力と総流量の関係

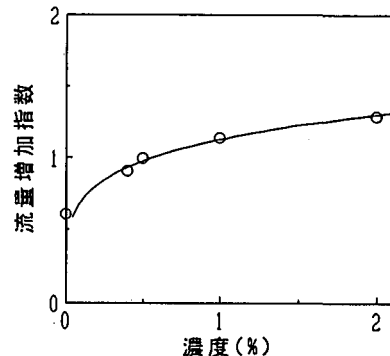


図-4 グラウトの濃度と流量増加指数の関係

亀裂の末端で流れが層流になっていることに起因していると考えられる。また、濃度の高いグラウトの場合に流量増加指数が1.0 よりも若干大きくなるのは、高粘性流体が非ニュートン流体であるためと考えられ、このことは、図-3を普通目盛りで書き改めた図-5において注入圧力と総流量の関係が曲線(擬塑性流体)または原点を通らない直線(ビンガム流体)で近似できることから推察できる。

なお、図-3によれば、グラウトの流量(注入量)はその濃度が低いほど大きくなるが、グラウティングの目的はグラウトの流量(注入量)を最大にすることではなく、セメントの注入量を最大にすることである。このため、薄すぎるグラウトではグラウトの流量(注入量)が大きくてもセメントの注入量が小さくなり、また濃すぎるグラウトではグラウトの流量(注入量)が小さくなってセメントの注入量も小さくなる。そこで、実際のグラウティングでは、セメントの注入量を最大にする適切な濃度を選定することが重要である。

3.2. 濃度と総流量の関係

次に、グラウトの濃度と総流量の関係を図-6に示す。図によれば、注入圧力が小さい場合には、グラウトの濃度が増加するにしたがってグラウトの総流量は減少するが、注入圧力が大きい場合には、グラウトの濃度がある程度大きくなるまでは、グラウトの濃度の増加に対するグラウトの総流量の変化は小さいことがわかる。したがって、高い注入圧力でグラウトを注入する場合には、ある程度濃いグラウトを用いることが有利であるといえる。

3.3. 亀裂内の圧力分布

次に、注入口での注入圧力を基準として正規化した亀裂内の圧力分布を図-7に示す。図によれば、水の場合、注入口である中央付近での圧力変化が大きい。これは、乱流状態では圧力勾配が流速の2乗に比例するため、流速が大きい場所で圧力勾配が著しく大きくなるからである。また、注入圧力が高い場合ほどその傾向が顕著になっているが、これは、注入圧力が低い場合には亀裂末端で流れが層流状態となるが、注入圧力が高くなるにしたがって乱流域が徐々に拡大していくためと考えられる。一方、グラウトの濃度が高い場合には、注入口の圧力が遠くまで伝達しているが、これは、濃いグラウトの流れが層流状態となって圧力勾配が流速の1乗に比例するため、乱流状態の場合ほど中央部での圧力低下が生じないことによっている。したがって、濃いグラウトを用いて層流状態で注入を行えば、グラウトの圧力を遠くまで伝播させることができる。

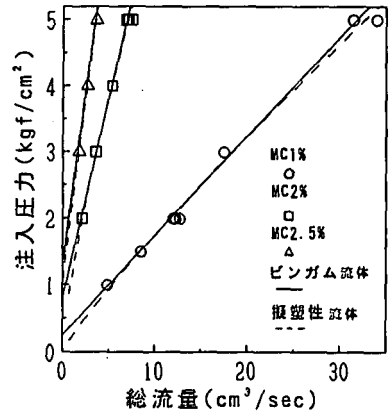


図-5 総流量と注入圧力の関係

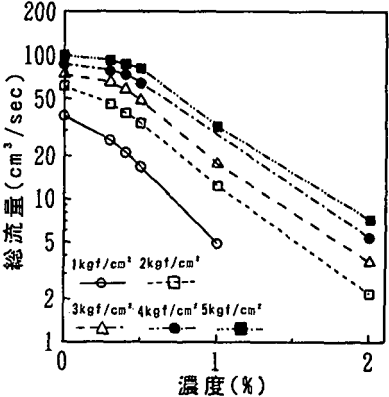


図-6 グラウトの濃度と総流量の関係

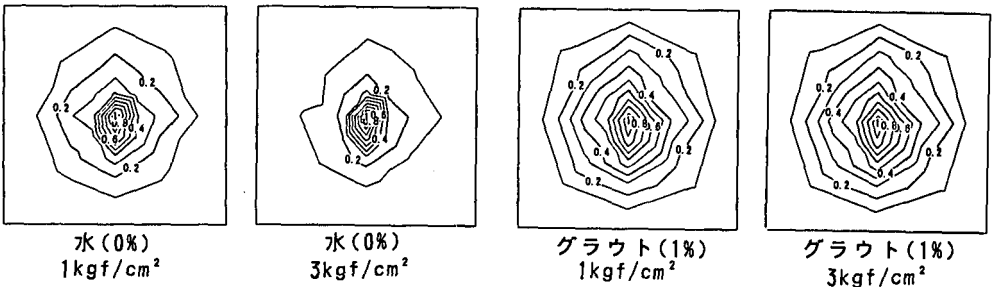


図-7 亀裂模型内の圧力分布

3.4. 個々の亀裂毎の流量特性

各亀裂の出口における流量を総流量で除した値をその亀裂の流量比と定義し、その分布を 図-8 に示す。なお、図中の横軸の番号は図-1 に示した亀裂の出口を表している。図によれば、亀裂模型の外周の各辺の中央部ほど流量比が大きくなり、グラウトは流れやすいところを流れていることがわかる。また、水の流量比と濃度の高いグラウトの流量比を比較すると、濃度の高いグラウトほど流れやすい亀裂により多く流れることがわかる。

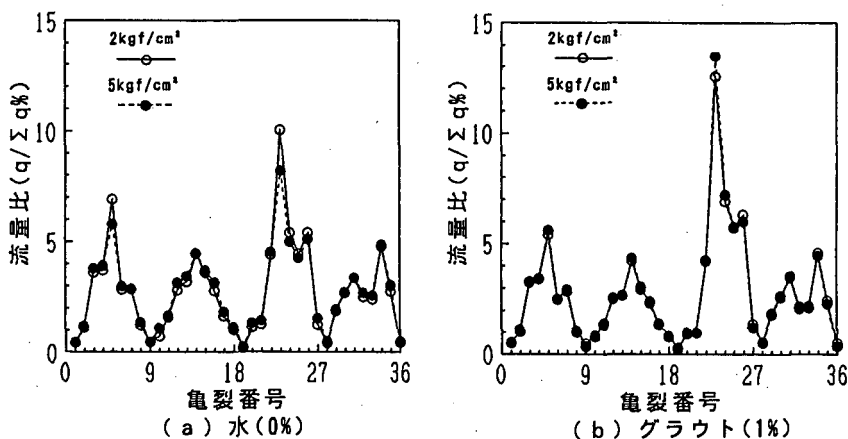


図-8 各亀裂出口の流量比の分布図

次に、この結果を詳細に検討するため、水と濃いグラウトのそれぞれに対して、流量比の大きい亀裂、流量比が中程度の亀裂、流量比が小さい亀裂について注入圧力と亀裂出口の流量の関係を求める。図-9 になる。図によれば、水の場合、流量比の大きい亀裂ほどグラフの勾配が緩くなっていることがわかる。これは、流量比の大きい亀裂ほど乱流で流れる区間が長いためである。一方、濃いグラウトの場合、どの亀裂においてもグラフの勾配は同一であり、流れの状態に差がない（全て層流で流れている）ことを示している。この結果を注入圧力と流量比の関係で再整理したものが、図-10 である。図によれば、水の場合、流量比の大きな亀裂では注入圧力の増加とともに流量比が徐々に小さくなり、これに対応して流量比の小さな亀裂の流量比は少しずつ増加することになる。一方、濃いグラウトの場合、注入圧力の大小によらず流量比はほぼ一定となっており、各亀裂に対するグラウトの入り方は注入圧力に依存しないことがわかる。

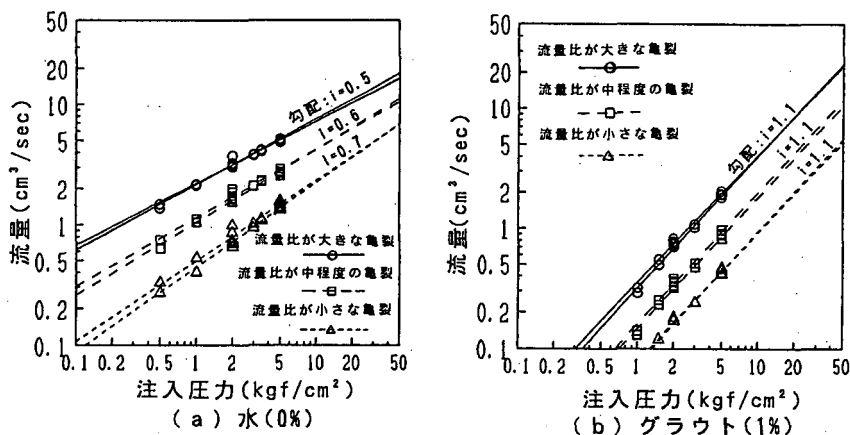
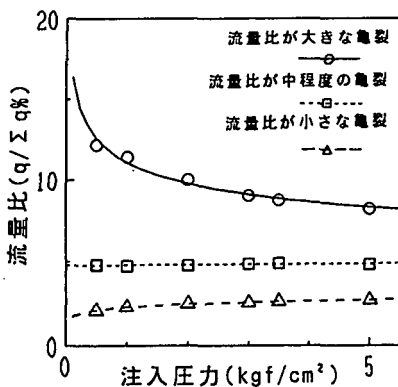
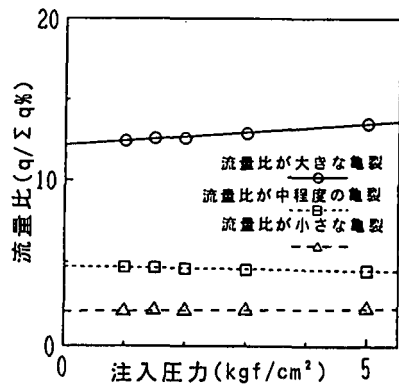


図-9 注入圧力と各亀裂出口の流量の関係



(a) 水(0%)



(b) グラウト(1%)

図-10 注入圧力と各亀裂出口の流量比の関係

さらに、この結果をグラウトの濃度と各亀裂の流量比の関係として整理したものが図-11である。図によれば、濃度0.3%程度を境として、これより薄いグラウトでは注入圧力が高いほど流量比の大きな亀裂の流量比は減少していくが、これより濃いグラウトでは各亀裂の流量比は注入圧力の大小にほとんど影響されないことがわかる。

4. まとめ

以上の実験結果から明らかとなったグラウトの注入特性をとりまとめると次のようになる。

- ① 岩盤内の亀裂を流れるグラウトはその濃度によって層流または乱流状態で流れる。
- ② 層流状態でグラウトが流れる場合、注入圧力の変化による流量(注入量)の変化は大きく、乱流状態でグラウトが流れる場合、注入圧力の変化による流量(注入量)の変化は小さい。
- ③ この結果、高い注入圧力においては、濃度の違いによるグラウトの流量(注入量)の差は小さくなる。
- ④ 乱流状態に比べて、層流状態では注入箇所から離れた地点まで圧力が伝播する。
- ⑤ 濃いグラウトほど流れやすい亀裂内を選択的に流れる傾向がある。
- ⑥ 薄いグラウトの場合、注入圧力を高めることによって、流れにくい亀裂により多くのグラウトを注入することができる。

なお、今回の実験はグラウトの粘性に着目したものであって、グラウトの粒子径の影響については考慮しなかった。したがって、グラウトの粒子径が注入状況に及ぼす影響については今後の課題として検討を進めていきたいと考えている。

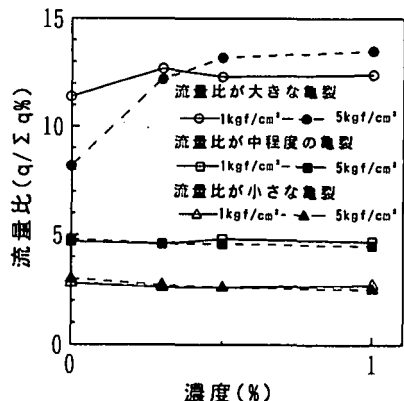


図-11 濃度と各亀裂出口の流量比の関係